气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响

张蛟(1);崔世友(1);冯芝祥(2);王奎山(1);翟彩娇(1)

(1). 江苏沿江地区农业科学研究所　南通　226541; (2). 江苏省如东县气象局　如东　226400

摘　要: 为探明气候因子对沿海滩涂表层土壤盐分季节性变化规律的影响，并探讨植被和秸秆覆盖对滩涂土壤脱盐效果及控盐的作用。2014 年 5 月—2015 年 5 月，在江苏沿海滩涂盐碱地(中重度盐分)，设置 4 种处理进行田间试验，分别为对照(裸地, CK)、秸秆覆盖(覆盖量为 15 t·hm^{-2}, SM)、植被覆盖(PC)和植被+秸秆覆盖(覆盖量为 7.5 t·hm^{-2}, PC+1/2SM)，监测了气候因子和表层土壤盐分的季节性动态变化。结果表明: 1)在沿海滩涂裸地中，土壤盐分具有一定程度的季节性规律，表现为在 10—12 月具有明显的积盐效果，且在 10 月 EC1∶5 达到最大值为 3.90 dS m^{-1}; 2)相关分析表明: 采样前 7 d 降雨累积量与土壤盐分变化有着极密切负相关关系; 气候因子的多因子及互作逐步分析表明: 降雨量增加可以促进土壤脱盐作用，大气温度升高可加剧土壤盐分表聚，降雨量和大气温度的互作效应增加会对土壤盐分累积产生正效应; 3)地表覆盖(包括 PC 和 SM)显著地改变了气候因子对土壤盐分动态变化的影响，且大量秸秆覆盖对滩涂表层土壤脱盐具有更明显的效果。因此，在沿海气候向暖湿方向发展的趋势下，综合考虑脱盐及控盐作用，选择适量秸秆覆盖(如覆盖量 15 t·hm^{-2})或适量秸秆覆盖(15 t·hm^{-2})结合植被种植覆盖，同时充分利用沿海地区降雨量集中的特点，这可能是未来滩涂盐碱盐渍土快速脱盐和土壤改良重要措施。

关键词: 气候变化; 秸秆覆盖; 植被覆盖; 盐分动态; 沿海滩涂

中图分类号: S156.4

Climate factors and ground mulching affect soil salinity dynamic changes in coastal areas

ZHANG Jiao[1], CUI Shiyou[1], FENG Zhixiang[2], WANG Kuishan[1], ZHAI Caijiao[1]

(1. Jiangsu Yanjiang Institute of Agricultural Sciences, Nantong 226541, China; 2. Rudong Meteorological Observatory, Rudong County, 226400, China)

Abstracts: To elucidate the impact of climate factors on the seasonal variations of soil salinity and to explore the effects of plant cover and straw mulching on soil desalination and salinity control in coastal areas, a field experiment was conducted in the medium-heavy salinity of coastal areas in Rudong, Jiangsu Province. Four treatment were applied in the present study: Control (bare land, CK), straw mulching (straw cover amount for 15 t·hm^{-2}, SM), plant cover (PC) and plant cover combined with straw mulching (straw cover amount for 7.5 t·hm^{-2}, PC+1/2SM). Climate factors (rainfall and atmospheric temperature) and topsoil salinity dynamic changes were determined from May 2014 to May 2015. Results showed that: (1) seasonal variations in some extent were shown in the bare land of coastal areas, with obviously salt accumulating from October to December and the highest $EC_{1:5}$ 3.90 dS m^{-1} in October; (2) the correlation analysis showed that soil salinity changes in the CK treatment had a significant negative correlation with the cumulative rainfall of the seven-day before sampling ($P < 0.01$) and with the cumulative rainfall of the fifteen-day before sampling ($P < 0.05$), but had no obviously significant correlations in SM, PC and PC+1/2SM treatments ($P > 0.05$); Under CK treatment, the multifactor and interphase analysis of the climate factors indicated that rainfall increase could promote soil desalinization ($P < 0.01$), atmospheric temperature rise could exacerbate soil salt accumulation in surface ($P < 0.01$), simultaneously, the increasing interaction between rainfall and atmospheric temperature would have a positive effect on soil salt accumulation ($P < 0.01$); (3) ground mulching, including plant cover and straw mulching, could significantly alter the effects of climate factors on the seasonal variations of soil salinity. Under the PC and PC+1/2SM treatment, the relationship of soil desalinization ratio (%) changes (Y) and treatment time (days, X) was expressed as quadratic function equations with $Y_{PC}= 0.001X^2–0.345X+54.41$ ($R^2= 0.456$, $P <0.01$) and $Y_{PC+1/2SM} = 0.001X^2–0.293X + 57.121$ ($R^2= 0.526$, $P < 0.01$), respectively; Under the SM treatments, the relationship was expressed as Logistic curve equation: $Y_{SM} = 94.912 /(1+e^{1.482-0.052X})$ ($R^2= 0.980$, $P <0.001$); In addition, the soil desalination rate could increase rapidly after 29 days of straw mulching treatment (that is June to August) and trend to be stable with the rate reaching 94.91 % after 70~80 days of straw mulching treatment; Moreover, large amounts of straw mulching (15 t·hm^{-2}) had a more obvious effect on soil desalination, but it also caused more obvious alkalinity problems. Therefore, to consider the desalination and salinity control, suitable amount of straw mulching (such as straw cover amount for 15 t·hm^{-2}) or suitable amount of straw mulching (straw cover amount for 15 t·hm^{-2}) combined with plant cover (such as *Sesbania cannabina Pers* and *Brassica juncea (L.) Czern. et Coss*.), at the same time taking full advantage of the characteristics of rainfall concentration in coastal areas, may be adopted to promote soil desalting effects and soil reclamation in the future direction of warming-wetting climate in the coastal area of coastal reclamations.

Keywords: climate changes; straw mulching; plant cover; salinity dynamic change; coastal areas

全球气候变暖是人类迄今面临的最大的环境问题，也是21世纪人类面临的最复杂的挑战之一[1-3]。IPCC(2007)报告指出[2]，近100 a全球平均地表温度上升了0.7 ℃，且过去50 a 升温率几乎是过去100 a的2倍。同时，根据气候变化国家评估报告对21世纪气候变化趋势做出的预测表明：到21世纪末，中国气温将会升高 3.9~6.0 ℃，降水量有望增加9%~11%[4]。气候因子变化，特别是降雨和气温变化，是盐碱荒地土壤盐分运移变化的重要驱动因素[5-8]，气温上升可以加剧土壤水分蒸发，带动土壤盐分向上移动，引起表层土壤盐分增加[9-10]；降雨对盐碱地土壤盐分具有淋洗脱盐作用，而脱盐程度及深度不仅受降雨量大小的影响，还受到降雨强度的影响[11]。目前，有关气候因子对土壤盐分的影响研究主要集中在典型荒漠区[6]、西北干旱区[8-9]、新疆干旱区或绿洲[7,12]的盐碱地，而关于气候因子对沿海滩涂盐渍土报道还比较少见[5]；此外，这些研究大多是单独研究降雨量或者气温变化对盐碱土土壤盐分的影响，而降雨量和气温变化的交互效应或共同作用还鲜有报道。 地面覆盖，包括秸秆覆盖、生草覆盖、有机肥覆盖、盐生或耐盐植物直接种植覆盖以及两种或多种措施结合的方法，对盐渍土的盐分调控及改良具有明显的作用[13-19]。大量研究表明，通过地面覆盖特别是秸秆覆盖可以增加土壤表面覆盖面积，覆盖物可以充当水汽蒸发的屏障，减少水分蒸发量和地表径流，同时增加水分的渗透作用，进而降低耕层土壤盐分含量及影响脱盐效果[13,18,20]；通过生物措施覆盖，可以改变土壤结构、养分以及微生物群落特征，进而影响盐分的运动特征来改良盐碱土[16,21]。虽然，地面覆盖对盐渍土盐分变化及改良效果有不少报道，其主要集中在已进行农业利用的地区[16,20]，但沿海滩涂新围垦地区，特别是针对中度和重度盐渍土，地面覆盖对土壤盐分的动态变化规律的影响还不多见。

据统计，全球约40%受重度盐渍化影响的滩涂湿地未来将被围垦并作为农业生产进行利用[22-23]。在我国，滩涂围垦开发已经成为滨海地区获得土地资源的重要手段，滨海盐土作为重要的后备资源，具有高盐碱、盐分分布空间不均衡性、时间分布的变异性、低养分、高矿化度地下水和地表淡水资源缺乏等特点[21,24-26]。因此，在开发利用沿海滩涂土地资源之前，明确滩涂土地资源的土壤盐分的动态变化规律，这对于今后如何合理与高效开发利用滩涂资源非常必要。江苏地区滩涂资源丰富，约占全国滩涂总面积的1/4，约为65.3万 hm^2，其围垦利用历史悠久[27]。综上，本研究拟以江苏沿海滩涂荒地土壤(盐分含量约 5~9 g/kg)作为研究对象，利用野外定位试验，研究裸地和不同地表覆盖条件下滩涂土壤盐分动态变化规律及脱盐效果；利用相关分析和多因子及互作逐步分析等方法，分析讨论降雨量和大气温度变化及两者之间交互效应对滩涂土壤盐分动态变化的影响。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究区位于江苏省如东县滩涂地区森茂生态园区(32°20′33″N，121°25′7″E),该地区属暖温带南部边缘，冬季受到季环流影响，以寒冷、少雨天气为主，夏季受东南季风影响，炎热、多雨，春秋季处于南北季风交替期，形成四季分明，干、湿、冷、暖天气多变的气候特征。降水充沛，年均雨量1 042 mm，汛期(6—9月)雨量相对集中，约占年总降雨量的55%~80%。年平均气温15.1 ℃，全年无霜期225 d，年平均日照2 136 h。试验进行期间日降雨量和日平均温度如图1所示。该园区为2007年新围垦潮上带，地下水位约为1.2~1.5 m，土质为中壤土，土壤类型为滨海盐土，盐分离子组成主要以 Na^+、K^+、SO_4^{2-}和 Cl^-为主。2014年3—4月，通过调查选择园区内新围垦未人工利用地形比较一致，中等盐分水平的田块作为试验样地，对样地土壤进行取样并测定基本理化性质。试验处理前(4月中旬),样地土壤的基本理化性状如下：$pH_{1:5}$值8.71，$EC_{1:5}$值1.81 dS m^{-1}，有机质和全氮含量5.81 g·kg^{-1}和0.50 g·kg^{-1}，碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为31.02 g·kg^{-1}、9.66 g·kg^{-1}和207.0 mg·kg^{-1}，容重为1.38 g·cm^{-3}，总孔隙度为48.97%，砂粒、粉粒及粘粒含量分别为19.68%、59.20%和23.32%，Na^+和 K^+含量分别为4.00 g·kg^{-1}和1.78 g·kg^{-1}，SO_4^{2-}和 Cl^-含量分别为0.399 g·kg^{-1}和0.429 g·kg^{-1}。试验样地初始生长着少量杂草、野生田菁(*Sesbania cannabina (Retz.) Poir.*)、野油菜(*Brassica juncea (L.) Czern. et Coss.*)、芦苇(*Phragmites australias Trin.*)、碱蓬(*Suaeda glauca (Bunge) Bunge*)等耐盐或盐生植物。

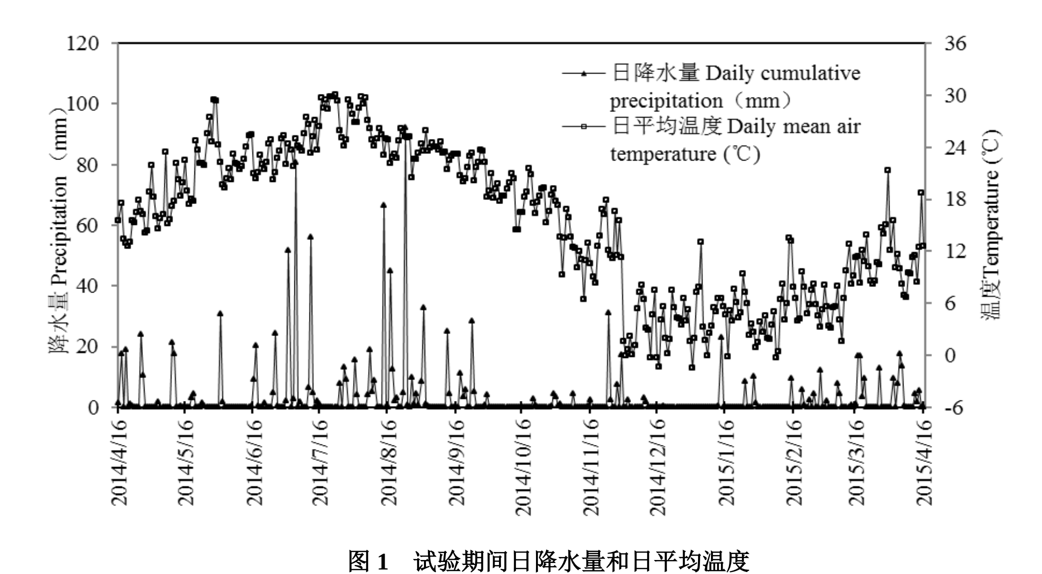


图 1　试验期间日降水量和日平均温度

Fig. 1　Daily cumulative precipitation and mean air temperature during the experimental period

1.2　试验设计与采样

2014 年 4 月底，在如东滩涂森茂生态园区内选择地形平整、杂草作物、盐分含量基本一致的区域作为试验样地，进行野外试验布置。本试验共设 4 个处理: 1) 对照(裸地, Control, CK); 2) 秸秆覆盖(秸秆覆盖量为 15 t·hm^{-2}, Straw Mulching, SM); 3) 植被覆盖(田菁-野生芥菜, Plant Cover, PC); 4) 植被+秸秆覆盖(田菁-野生芥菜+秸秆覆盖量为 7.5 t·hm^{-2}, plant cover combined with 7.5 t·hm^{-2} straw mulching, PC+1/2SM)。试验小区面积为 50 m^2(5 m×10 m), 5 次重复，采用随机区组设计。为有利于排水，每相邻两个小区之间进行挖沟隔开，沟宽大约为 30 cm, 沟深约为 45 cm。秸秆覆盖小区 5 月 1 日进行秸秆覆盖处理，秸秆为小麦自然风干全株秸秆。植被覆盖的小区，在 5 月 1 日到 5 月 3 日期间，进行田菁播种(条播，行距 50 cm，播种量 5 kg·667m^{-2}，等田菁苗生长到 10~15cm 高，间苗保证株距 25 cm 左右，滩涂田菁最高可生长到 1.70-1.80 m, 10 月份用镰刀去除田菁地上部分)，野生芥菜在 10 月下旬移栽(行距 50cm，株距 20 cm，由于受到盐分障碍的影响，成活率仅为 40%-50%左右)。同时，植被结合秸秆覆盖的小区，在种植田菁-野生芥菜时，并在行间进行 7.5 t·hm^{-2} 秸秆覆盖处理，均匀覆盖在土壤表面。其中，田菁(*Sesbania cannabina Pers.*)是豆科牧草类一年生草本植物，常被用作新垦盐碱荒地改良的先锋植物，其耐盐能力在 6 g·kg^{-1} 左右，耐盐极限为 10 g·kg^{-1} 左右[28-29]；野生芥菜(*Brassica juncea* L.)也称野油菜，为滩涂野生生长的耐盐作物，本项目组前期实地鉴定研究发现其耐盐能力可达到 5~6 g·kg^{-1} 以上。同时，野生芥菜具有叶大覆盖面积大，可以很好的充当水汽蒸发的屏障。通过田菁-野生芥菜轮作，基本可保证土壤全年处于植被覆盖状态。试验期间不进行人为灌溉、施肥和机械耕作，为避免扰动土壤，用小刀或镰刀进行地面去除地面少量杂草，保持对照试验小区地表裸露。本试验采样安排从 2014 年 5 月到 2015 年 5 月进行，每月进行 2 次(每月 1 日和 15 日前后，均在上午 8:00~10:00 进行采样)土壤表层 0~20cm 的样品采集。种植植被的小区采样采集行间土壤。每个小区内采用多点取样法进行田间采样，然后将土壤混合样品装入样品袋带回实验室进行土壤水分、pH、盐分等土壤指标测定，同时进行大气温度和降雨量的动态监测(由如东县气象局提供数据)。本试验田间采样进行 1 年。

1.3　土壤测定与方法

土壤测定方法具体如下：土壤容重采用环刀法；土壤含水量采用烘干法；土壤含盐量采用电导率法(土水比 1:5); pH 采用 pH 计法(土水比 1:5)；颗粒组成采用比重计法；有机质采用重铬酸钾−外加热法；全氮采用凯氏消煮法；有效磷采用碳酸氢钠浸提−钼蓝比色法；碱解氮采用碱解扩散法；有效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法；氯离子的测定采用硝酸银滴定法；硫酸根离子的测定采用容量法；钠和钾离子的测定采用火焰光度法；土壤孔隙度采用计算法。以上测定方法均参照土壤农业化学分析方法[30]。

1.4　数据分析

本文中所有土壤指标数据均为 5 次重复的平均值。利用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件上进行数据分析与作图，采取随机区组单因素方差分析(One-way ANOVA)，采用 LSD 法进行数值的多重比较

(P<0.05)。用 Pearson 相关分析法分析土壤电导率($EC_{1:5}$)和气候因子(包括采样前 1、3、7 和 15 天的累积降雨量(mm)和大气平均温度(℃))之间的简单相关性；同时，为分析气候因子间交互效应对滩涂土壤盐分变化的综合影响，利用多因子及互作项逐步回归分析、偏相关分析和通径分析等方法，分析了气候因子以及气候因子间交互效应对土壤盐分(电导率)之间的影响关系；此外，滩涂土壤脱盐速率的动态变化规律与处理时间(d)之间的关系进行非线性回归拟合，在单独秸秆覆盖条件下，用二次曲线函数、指数函数、幂函数及 Logistic 函数进行拟合，并用采用非线性最小二乘法进行回归分析选择最优拟合方程，而植被覆盖条件下，用一元二次多项式方程 $Y = aX^2 + bX + c$ 进行拟合，其中 Y 代表土壤脱盐率(%), X 代表处理后的时间天数(d)。为比较不同处理的脱盐效果，使用土壤脱盐率，计算公式如下：土壤脱盐率(%)=［(对照(CK)盐分-覆盖处理盐分)］/对照盐分］×100。

2 结果与分析

2.1 不同地表覆盖下沿海滩涂土壤盐分动态变化规律

如图 2 所示，在沿海滩涂裸地(对照)中，表层土壤盐分具有明显的季节性变化规律，表现为在 10—12 月具有明显的积盐作用，并在 10 月份期间土壤盐分达到最大值($EC_{1:5}$ 为 3.90 dS m^{-1})；单独植被覆盖(PC)和植被结合半量秸秆覆盖(PC+1/2SM，覆盖量为 7.5 t·hm^{-2})条件下，表层土壤盐分变化与裸地土壤具有相似的积盐返盐的季节性变化趋势，但相比裸地而言，地表覆盖处理后全年各时期表层土壤盐分均有明显的脱盐特征；秸秆覆盖处理后(SM，秸秆覆盖量为 15 t·hm^{-2})，经过雨季(6—7 月)研究区内滩涂土壤盐分实现快速脱盐，从初始电导率 1.90 dS m^{-1} 左右到 7 月中旬降到 0.15 dS m^{-1} 左右，之后盐分含量一直在 0.10~0.20 dS m^{-1} 之间波动。

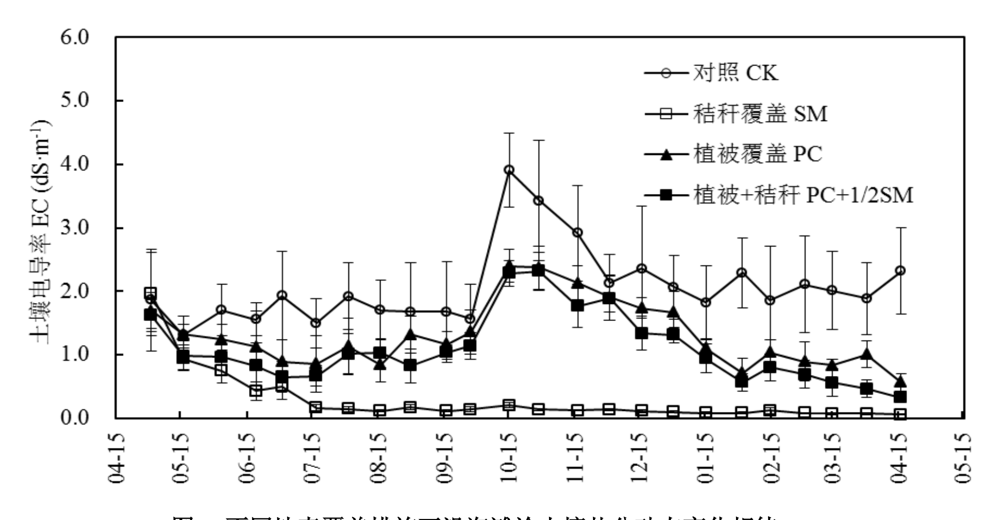


图 2 不同地表覆盖措施下沿海滩涂土壤盐分动态变化规律

Fig.2 Effects of different ground mulching on soil salinity variations in coastal areas

2.2 气候变化对沿海滩涂土壤盐分(电导率)动态变化的影响

2.2.1 滩涂土壤电导率与气候因子的相关性

本研究针对采样前 1 天、前 3 天、前 7 天和前 15 天的累积降雨量和大气平均温度，与滩涂裸地(对照)条件下土壤盐分(电导率)进行简单相关性分析，由表 1 可知，土壤表层土壤电导率与采样前 1 天、前 3 天的累积降雨量均没有显著相关性，而与采样前 7 天以上(即前 7 天(P<0.01)和前 15 天(P<0.05))的累积降雨量具有显著的负相关；然而，滩涂表层土壤电导率与采样前 1 天、前 3 天、前 7 天和前 15 天的大气平均温度均没有显著的相关性。

表 1 沿海滩涂地区采样前 1, 3, 7 和 15 天累积降雨量和大气平均温度与表层土壤盐分含量之间的相关性

Table 1 Correlation between accumulative rainfall and average air temperature of 1, 3, 7 and 15 days before sampling and topsoil salinity in coastal areas

气候因子 Climate factors	累积降雨量 Accumulative rainfall(mm)	大气平均温度 Average air temperature(℃)
采样前 1 天	Y = 0.002X + 1.880, R^2 = 0.001	Y = -0.021X + 2.396, R^2 = 0.075

One-day before sampling		
采样前 3 天 Three-day before sampling	$Y = -0.004X + 1.955, R^2 = 0.037$	$Y = -0.020X + 2.375, R^2 = 0.072$
采样前 7 天 Seven-day before sampling	$Y = -0.010X + 2.309, R^2 = 0.308^{**}$	$Y = -0.017X + 2.328, R^2 = 0.056$
采样前 15 天 Fifteen-day before sampling	$Y = -0.006X + 2.349, R^2 = 0.236^{*}$	$Y = -0.015X + 2.291, R^2 = 0.044$

**: 在 $P = 0.01$ 水平上显著 Significant at $P = 0.01$; *: 在 P = 0.05 水平上显著 Significant at P = 0.05.

2.2.2 滩涂土壤电导率与气候因子的多因子及互作逐步分析

考虑到累积降雨量和大气温度等气候因子对滩涂土壤盐分的影响存在一定的互作效应，我们利用多因子及互作项逐步回归分析方法对滩涂土壤电导率(Y)与累积降雨量(X1)和大气温度(X2)(鉴于相关分析的结果，此处的累积降雨量(X1)和大气温度(X2)分别为采样前 7 天的累积降雨量和大气平均温度，下同)，建立气候因子与土壤电导率模型：Y=–108.398 3–2.361 7X1+26.187 7X2+0.132 3X1X2，其中模型决定系数为 0.974 0，剩余通径系数为 0.1612，其模型达到较高的精准水平。从模型可知，X1 与 Y 呈负相关(P<0.01)，X2 与 Y 呈正相关(P<0.01)，X1 与 X2 之间的互作效应与 Y 呈正相关(P<0.01)。

2.2.3 滩涂土壤电导率与气候因子的偏相关分析

由表 2 可知，土壤电导率与气候因子的偏相关分析：累积降雨量(X_1)与土壤电导率(Y)的偏相关系数为 –0.365 3，有弱相关性但未达到显著水平；大气温度(X_2)与土壤电导率(Y)的偏相关系数为 0.958 4．达到极显著水平；累积降雨量(X_1)与大气温度(X_2)互作效应偏相关系数为 0.436 0，达到显著水平。

表 2 滩涂土壤电导率值与采样前 7 天累积降雨量和大气平均温度之间的偏相关分析

Table 2 Partial correlation coefficients between soil electrical conductivity and accumulative rainfall and average air temperature of seven-day before sampling in coastal areas

因子 factors	r	t	P
Y, X_1	-0.3653	1.7551	0.0938
Y, X_2	0.9584	15.0119	0.0001
Y, X_1X_2	0.4360	2.1668	0.0419

Y 代表土壤电导率 Y represents soil electric conductivity; X_1 代表累积降雨量 X_1 represents accumulative rainfall; X_2 代表大气温度 X_2 represents air temperature.

2.2.4 滩涂土壤电导率与气候因子的通径分析

由表 3 可知，滩涂土壤电导率与气候因子的直接通径系数: X_1(–0.269 0)、X_2(0.872 8)、X_1X_2(0.379 5)，说明累积降雨量(X_1)对滩涂土壤电导率值增加的直接作用是负面的效应，大气温度(X_2)、累积降雨量(X_1)与大气温度(X_2)互作效应均对滩涂土壤电导率值增加的直接作用是正面的效应。而间接作用：累积降雨量(X_1)a 主要通过 X_2(0.506 1)、X_1X_2(0.365 3)间接正效应表达；大气温度(X_2)主要通过 X_1(–0.156)间接负效应以及 X_1X_2(0.266 1)间接正效应综合表达；X_1X_2 主要通过 X_1(–0.258 9)间接负效应以及 X_2(0.612 1)间接正效应综合表达。

表 3 滩涂土壤电导率值与采样前 7 天累积降雨量和大气平均温度之间的通径分析

Table 3 Path analysis between soil electrical conductivity and accumulative rainfall and average air temperature of seven-day before sampling in coastal areas

因子 factors	直接影响力 Indirect effect	→X_1	→X_2	→X_1X_2
X_1	–0.269 0		0.506 1	0.365 3
X_2	0.872 8	–0.156		0.266 1
X_1X_2	0.379 5	–0.2589	0.612 1	

2.3 地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分变化规律的影响

2.3.1 地表覆盖条件下气候因子与滩涂土壤电导率变化的关系

由表 4 可见，地表覆盖条件下，滩涂土壤电导率与采样前 1 天、前 3 天、前 7 天和前 15 天的累积降雨量和大气平均温度均没有显著的相关性(P > 0.05)，结合表 1 可知，地表覆盖改变了降雨量对滩涂土壤盐分

(电导率)变化的影响。

表 4　地表覆盖条件下气候因子与滩涂土壤盐分变化的相关关系 R^2 值

Table 4　R^2 of the correlation between climate factors and soil salinity changes under ground cover in coastal areas

处理 Treatment	采样前 1 天 One-day before sampling	采样前 3 天 Three-day before sampling	采样前 7 天 Seven-day before sampling	采样前 15 天 Fifteen-day before sampling
	累积降雨量 Accumulative rainfall (mm)			
秸秆覆盖 SM	0.077	0.002	0.004	0.005
植被覆盖 PC	0.048	0.014	0.027	0.121
植被+秸秆 PC+1/2SM	0.102	0.013	0.011	0.097
	大气平均温度 Average air temperature (℃)			
秸秆覆盖 SM	0.058	0.044	0.060	0.040
植被覆盖 PC	0.006	0.003	0.000	0.000
植被+秸秆 PC+1/2SM	0.000	0.000	0.004	0.007

**:在 P = 0.01 水平上显著 Significant at P = 0.01; *: 在 P = 0.05 水平上显著 Significant at P = 0.05

2.3.2　地表覆盖条件下滩涂土壤脱盐率(%)与覆盖时间(d)的关系

地表覆盖条件下，滩涂土壤脱盐率(%)与覆盖处理时间(d)之间关系做散点图如图 3 所示，两者之间均具有非线性回归关系。在植被覆盖(PC)和秸秆+植被覆盖(PC+1/2SM)条件下符合二次函数方程，分别可用 Y_{PC}=0.001X^2–0.345X +54.41(R^2=0.456, P<0.01)和 $Y_{PC+1/2SM}$ = 0.001X^2–0.293X+57.121(R^2=0.526, P<0.01)；而秸秆覆盖(SM)条件下，土壤脱盐率(%)与秸秆覆盖时间(d)初步判断可满足常用的二次函数、指数函数、幂函数和逻辑函数等拟合回归方程，分别进行 F 检验后，结合比较 R^2 和 P 值，进行最优拟合回归方程可得出，Logistic 曲线方程 Y_{SM} =94.912/(1+$e^{1.482-0.052X}$), R^2=0.980, P<0.001(图 3 和表 5)。结合实际问题分析可知，在秸秆覆盖条件下, Logistic 回归方程中参数 b_1 为滩涂土壤脱盐率(%)的上限值，估计值为 94.912±0.596，其 95%置信区间为 93.668~96.156；参数 b_3 为增加速率，估计值为–0.052±0.004，其 95%置信区间为–0.060~–0.044；当土壤脱盐率(%)达到上限值一半时(即 Y_{SM}=94.912/2)，增加速率最快，这时 X=29，表明秸秆覆盖 29 天后，土壤脱盐率会迅速增加(即 6~8 月份)，并在秸秆覆盖处理后 70~80 d 趋于土壤脱盐率(%)趋于稳定。

表 5　滩涂土壤脱盐率(%)和秸秆覆盖处理时间(d)之间拟合方程与参数估计值

Table 5　The fitting equations and parameter estimates between soil desalinization ratios (%) and straw mulching time (d) in coastal areas

方程 Equation	参数估计值 Parameter Estimate			模型汇总 Model Summary				
	b_1	b_2	b_3	df_1	df_2	F	R^2	$P(Sig.)$
二次曲线 Quadratic	45.175	0.4693	-0.001	2	20	32.790	0.766	0.000
指数曲线 Exponential	71.263	0.001		1	21	15.215	0.420	0.000
幂函数 Power	32.335	0.199		1	21	54.828	0.723	0.000
逻辑函数 Logistic	94.912	1.482	-0.052	2	20	488.176	0.980	0.000

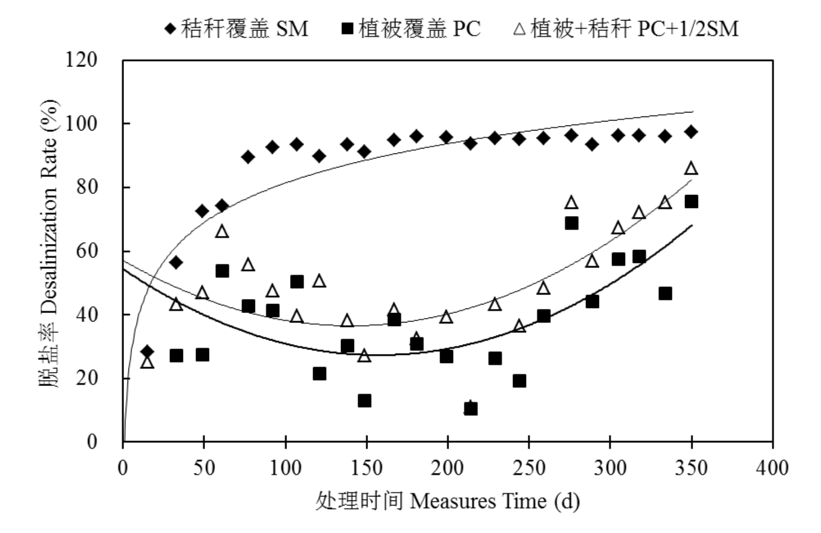


图 3　秸秆和植被覆盖对滩涂土壤脱盐率(%)的动态变化影响

Fig.3　Effects of soil desalinization ratio changes under straw mulching and vegetation planting in coastal areas

2.3.3　地表覆盖对滩涂土壤电导率、pH 和土壤水分的影响

由表 6 可知，与裸地对照相比，无论是植被覆盖还是秸秆覆盖均显著降低了土壤 $EC_{1:5}$ 值(P<0.05)，但也均显著增加了土壤 $pH_{1:5}$ 值(P<0.05)，且 $EC_{1:5}$ 越大, $pH_{1:5}$ 越小；可见地表覆盖虽然降低了滩涂土壤的盐分，但也增加了土壤 pH；另外，秸秆覆盖处理可以显著增加土壤水分含量(P<0.05)，单独植被覆盖对土壤含水量没有明显的影响(P>0.05)。

表 6　不同措施处理下滩涂土壤年平均 EC、pH 和水分含量的差异性

Table 6　Differences on the mean annual value of soil EC, pH and moisture content in different measures in coastal areas

处理 Treatment	$EC_{1:5}$ (dS m^{-1})	$pH_{1:5}$	土壤水分 Soil moisture (g·kg^{-1})
对照 CK	2.06±0.54a	8.71±0.14d	266.84±1.63bc
秸秆覆盖 SM	0.28±0.03c	9.35±0.12a	274.13±3.81a
植被覆盖 PC	1.30±0.18b	8.86±0.13c	263.39±6.55c
秸秆+植被 PC+1/2SM	1.08±0.10b	9.16±0.04b	273.25±4.25ab

同一列数据带不同字母表示差异显著(P < 0.05)。Different letters meant significantly different at P = 0.05 level.

3　讨论

3.1　气候因子变化对沿海滩涂土壤盐分动态变化的影响

气候变化，特别是降雨量和气温变化，是盐碱荒地土壤盐分运移变化的重要驱动因素[5-8]。本研究中，在沿海滩涂裸地中，表层土壤盐分具有明显的季节性变化规律，表现为在秋冬季(10~12 月)具有明显的积盐作用，并在 10 月份期间土壤盐分达到最大值(图 2)，这与赵秀芳等[31]的研究结果有一定相似。他们研究表明，苏北滩涂区土壤表层盐分随季节波动剧烈，盐分在夏季呈下降趋势，秋冬季呈上升趋势。也有在天津滨海地区的研究发现[5]，自然状态下土壤盐分含量具有春季强烈积盐、雨季脱盐、秋季缓慢积盐和冬季稳定的明显季节性变化特征，这与本研究的土壤盐分变化规律既有相似又有一定差异，这可能是由于江苏沿海滩涂和天津滨海地区降雨量时间分布和气温变化的差异造成的。本研究中，在未开发利用的沿海滩涂荒地，降雨是唯一的水分来源，在 6~8 月雨季降雨集中，土壤表层盐分经过降雨淋洗，盐分浓度下降达到最低值，而在 9、10 月，江苏沿海滩涂降雨较少，在高蒸发力的作用下，伴随着雨季储存在土壤中水分剧烈蒸发，土壤中盐分在表层聚积而盐分浓度增加达到最大值[8]。

同时，本研究发现，滩涂裸地(中重度盐分)表层土壤盐分变化与采样前 1 天和前 3 天的累积降雨量均没有显著相关性，而与采样前 7 天以上的累积降雨量具有显著负相关；而表层土壤盐分与采样前 1、3、7 和 15 天的大气平均温度均没有显著的相关性。考虑滩涂盐碱荒地盐分变化是降雨量和大气温度变化共同作用

的影响，两者之间具有一定的互作效应[6]。我们利用多因子及互作逐步分析、偏相关分析及通径分析方法对滩涂土壤电导率(Y)与采样前 7 天的累积降雨量(X_1)和大气温度(X_2)进行分析发现，累积降雨量(X_1)对江苏沿海滩涂土壤电导率值(盐分)增加的作用具有直接负效应，大气温度(X_2)、累积降雨量(X_1)与大气温度(X_2)互作效应均对滩涂土壤电导率值的增加作用是直接正效应。我们可以得出：在江苏沿海滩涂盐碱裸地(荒地)中，降雨量增加对表层土壤盐分累积具有显著的消极作用，大气温度升高对表层土壤盐分累积具有显著的积极作用，而两者的交互效应对表层土壤盐分累积具有明显的正效应。因此，在全球气候不断变暖的背景下，沿海滩涂气候有逐渐向暖湿方向发展的趋势，这有可能会加剧沿海滩涂荒地土壤的盐渍化程度。

3.2　地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态变化的影响

本试验观察期间,秸秆覆盖(覆盖量为 15 t·hm^{-2})措施下，经过梅雨季节(6~8 月)，沿海滩涂地区表层土壤盐分实现快速脱盐，之后盐分一直维持较低水平上下波动；同时,种植田菁-野生芥菜及种植田菁-野生芥菜结合少量秸秆覆盖措施下，表层土壤盐分变化与裸地土壤具有相似的积盐返盐的变化趋势，但相比裸地而言，植被覆盖期间表层土壤具有明显的脱盐特征，特别是野生芥菜具有叶大覆盖面积大的特点，野生芥菜生长到现蕾后(即 2~5 月)后土壤脱盐更为明显(图 2)。这些结果说明，在江苏沿海滩涂地区，秸秆覆盖(覆盖量为 15 t·hm^{-2})对土壤盐分具有相当好的脱盐和控盐作用，选择种植合适的耐盐植物也会对土壤盐分有明显脱盐和控盐效果，但少量秸秆覆盖对盐分变化的影响不明显(表 6)，这与前人有关秸秆覆盖对滨海盐土盐分的研究结论有一定的相似之处[5,32,-33]。秸秆覆盖和植被覆盖改变了表层土壤盐分的季节性变化规律，可能是因为地表覆盖改变了降雨量和大气温度对表层土壤盐分的影响(表 1 和表 4)，地表覆盖不仅可以增加土壤的淋盐洗盐作用，而且地表覆盖可以很好的充当水汽蒸发的屏障，最终达到滩涂土壤脱盐及控盐的效果。但需要注意的是，地表覆盖降低了滩涂土壤的盐分，也增加了土壤的碱化程度。

此外，我们对土壤脱盐率(%)和覆盖处理时间(d)进行了回归拟合，并比较得出最优拟合回归方程。我们分析得出: 1)种植耐盐植物(植被覆盖)条件下，土壤脱盐率(%)动态变化与覆盖处理时间(d)符合二次函数关系 $Y_{PC}= 0.001X^2–0.345X + 54.41$($P$<0.01)，说明土壤脱盐率与耐盐植物的生长状况紧密相关，当田菁或野生芥菜生长到枝叶茂盛时(即田菁生长时 6 月中旬~8 月中旬和野生芥菜生长时期的 2~5 月)表层土壤脱盐效果最好，而在 9、10 月时表层土壤脱盐效果比较差(图 2 和图 3); 2)秸秆覆盖(SM)条件下，土壤脱盐率(%)动态变化与覆盖处理时间(d)关系最优方程符合 Logistic 曲线方程 $Y_{SM} = 94.912 /(1+e^{1.482-0.052X})$ (P<0.001)，说明在江苏沿海滩涂中重度盐渍土上，在梅雨季节来临之前(5 月初)进行秸秆覆盖(覆盖量为 15 t·hm^{-2})，在覆盖处理 1 月后，充分利用江苏沿海地区降雨量集中(6~8 月份)的特点，土壤脱盐率会迅速增加，处理 70~80 d 后表层土壤盐分趋于稳定，土壤脱盐率可达到 94.91%，土壤脱盐效果极其显著(P<0.001)；而之后维持土壤表面秸秆覆盖处理，可起到很好的控制土壤返盐的效果。

总之，在江苏沿海滩涂地区，针对中重度盐渍土进行植被覆盖或秸秆覆盖措施，均对滩涂表层土壤脱盐具有明显的效果，相比单独植被覆盖及植被结合半量秸秆覆盖措施，大量秸秆覆盖对滩涂土壤快速脱盐和控制返盐效果更为显著，而且实际操作更为方便。但同时，研究表明田菁等植被种植可以改善土壤养分和结构状况[28]。因此，综合考虑脱盐及控盐问题，选择适量秸秆覆盖(如覆盖量为 15 t·hm^{-2})或秸秆覆盖(15 t·hm^{-2})结合耐盐植被种植措施，并充分利用江苏沿海降雨量集中的特点，可能是未来进行滩涂中重度盐渍土改良和快速脱盐的重要措施。

4　结论

通过对江苏沿海滩涂中重度盐渍土 1 年野外定位试验，我们得出以下结论: 1)在江苏沿海滩涂盐碱荒地中，表层土壤盐分具有显著的季节性变化特征，表现为在秋冬季(10~12 月)具有明显的积盐作用，并在 10 月份期间土壤盐分达到最大值; 2)相关分析发现，采样前 7 天降雨累积量与表层土壤盐分变化有着密切负相关关系；考虑降雨和大气温度变化对土壤盐分变化影响的共同作用得出，降雨量增加有利于土壤脱盐作用，大气温度升高有利于土壤盐分表聚，气候暖湿作用增加会对土壤盐分累积产生正效应; 3)无论是植被覆盖还是秸秆覆盖显著地改变了气候变化(降雨和气温变化)对土壤盐分季节性变化特征的影响。因此，在沿海滩涂气候向暖湿方向发展的趋势下，综合考虑脱盐及控盐问题，选择适量秸秆覆盖(如覆盖量为 15 t·hm^{-2})

或秸秆覆盖(15 t·hm^{-2})结合耐盐植被种植措施，并充分利用江苏沿海降雨量集中的特点，可能是未来进行滩涂中重度盐渍土改良和快速脱盐的重要措施。

参考文献 References

[1] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D, et al. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO_2 concentrations [J]. Science, 2006, 312(5782): 1918-1921

[2] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Paris: Summary for Policymakers formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC. 2007

[3] 张旭博，孙楠，徐明岗，等. 全球气候变化下中国农田土壤碳库未来变化[J]. 中国农业科学. 2014, 47(23): 4648-4657
Zhang X B, Sun N, Xu M G, et al. Soil Organic Carbon in Agricultural Soils in China Under Global Climate Change [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(23): 4648-4657

[4] 丁一汇，任国玉，石广玉，等. 气候变化国家评估报告(Ⅰ):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展. 2006, 2(1): 3-8
Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al. National Assessment Report of Climate Change (Ⅰ): Climate change in China and its future trend [J]. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 3-8

[5] 王艳，廉晓娟，张余良，等. 天津滨海盐渍土水盐运动规律研究[J]. 天津农业科学. 2012, 18(02): 95-97
Wang Y, Lian X J, Zhang Y L, et al. Study on Water-salt Movement of Coastal Saline Soil in Tianjin [J]. Tianjin Agricultural Sciences , 2012, 18(02): 95-97

[6] 周丽，王玉刚，李彦，等. 盐碱荒地开垦年限对表层土壤盐分的影响[J]. 干旱区地理. 2013, 36(2): 285-291
Zhou L, Wang Y G, Li Y, et al. Effects of cultivation on soil salinity in upper soil profiles of the saline-alkali land [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(2): 285-291

[7] 王少丽，焦平金，许迪，等. 新疆旱区浅层土盐分动态及其影响因素[J]. 排灌机械工程学报. 2013, 31(07): 623-628
Wang S L, Jiao P J, Xu D, et al. Variation trends and influencing factors of shallow soil salinity in arid area of Xinjiang [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(07): 623-628

[8] 朱宏伟，夏军，曹国栋，等. 盐渍化弃耕地土壤盐分动态及其影响因素[J]. 土壤. 2013, 45(02): 1339-1345
Zhu H W, Xia J, Cao G D, et al. Dynamic change of soil salinity in salinization abandoned farmland and affecting factors [J]. Soils, 2013, 45(02): 1339-1345

[9] 肖国举，张强，李裕，等. 气候变暖对宁夏引黄灌区土壤盐分及其灌水量的影响[J]. 农业工程学报. 2010, 26(06): 7-13
Xiao G J, Zhang Q, Li Y, et al. Impact of climatic warming on soil salinity and irrigation amount of Yellow River irrigation areas in Ningxia Hui Autonomous Region. Transactions of the CSAE, 2010, 26(06): 7-13

[10] 李中昊，陈阜，文新亚，等. 气温上升对河套义长灌域土壤盐分含量的影响[J]. 中国农业大学学报. 2013, 18(01): 61-68
Li Z H, Chen F, Wen X Y, et al. Effects of climate change on soil salinity in Hetao irrigation area [J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(01): 61-68

[11] 方生，陈秀玲. 华北平原大气降水对土壤淋洗脱盐的影响[J]. 土壤学报. 2005, 42(05): 28-34
Fang S, Chen X L. Influence of atmospheric precipitation on soil leaching and desalinization in the north China plain [J]. Acta Pedologica Sinica , 2005, 42(05): 28-34

[12] 江红南，雷磊. 新疆渭干河三角洲绿洲土壤盐渍化及影响因子特征分析[J]. 湖北农业科学. 2014, 53(14): 3265-3270
Jiang H N, Lei L. Characteristics factors and soil salinization in Weigan River delta Oasis, Xinjiang Province [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(14): 3265-3270

[13] Mulumba LN, Lal R. Mulching effects on selected soil physical properties [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 106-111.

[14] Bezborodov GA, Shadmanov DK, Mirhashimov RT, et al. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 138(1-2): 95-102

[15] Pang H, Li Y, Yang J, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 1971-1977

[16] 张建兵，杨劲松，李芙荣，等. 有机肥与覆盖对苏北滩涂重度盐渍土壤水盐调控效应分析[J]. 土壤学报. 2014, 51(01): 184-188
Zhang J B, Yang J S, Li F R, et al. Effects of farmyard manure and mulching on soil water and salinity in severe salinized tide flat soil of north Jiangsu Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(01): 184-188

[17] 潘洁，王立艳，肖辉，等. 滨海盐碱地不同耐盐草本植物土壤养分动态变化[J]. 中国农学通报. 2015, 31(18): 168-172.
Pan J, Wang L Y, Xiao H, et al. Dynamic Changes of Soil Nutrients of Salt-tolerant Herbaceous Plants in Coastal Saline Soil [J].

Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(18): 168-172
[18] 单娜娜, 赖波, 杨志莹, 等. 准噶尔盆地西北缘不同盐生植物种植后土壤盐分变化研究[J]. 新疆农业科学. 2016, 53(12): 2314-2320
Shan N N, Lai B, Yang Z Y, et al. Study on Changes of Soil Salinity after Planting Halophyte in Northwest of Junggar Basin [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(12): 2314-2320
[19] 谢文军, 王济世, 靳祥旭, 等. 田菁改良重度盐渍化土壤的效果分析[J]. 中国农学通报. 2016, 32(06): 119-123
Xie W J, Wang J S, Jin X X, et al. Effect of *Sesbania cannabina* Cultivation on Severe Salinity Soil Fertility Improvement [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(06): 119-123
[20] 孙博, 解建仓, 汪妮, 等. 秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐动态的影响[J]. 干旱地区农业研究. 2011, 29(04): 180-184
Sun B, Xie J C, Wang N, et al. Effect of straw mulching on water -salt dynamic of saline soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(04): 180-184
[21] Li X, Chang S X, Salifu K F. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review [J]. Environmental Reviews, 2014, 22(1): 41-50
[22] FAO. Land Resources, Management, Planning and Use. Available online: http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush. 2008
[23] Lal R. Carbon sequestration in saline soils [J]. Journal of Soil Salinity and Water Quality, 2010, 1(2): 30-40
[24] He B, Cai Y, Ran W, et al. Spatial and seasonal variations of soil salinity following vegetation restoration in coastal saline land in eastern China [J] . Catena, 2014, 118: 147-153
[25] Abliz A, Tiyip T, Ghulam A, et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis, Northwestern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 1-15
[26] 王琪琪, 濮励杰, 朱明, 等. 沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究——以江苏省如东县为例[J]. 地理科学. 2016, 36(02): 256-264
Wang Q Q, Pu L J, Zhu M, et al. Soil quality evolution in coastal reclamation zones: a case study of Rudong county of Jiangsu Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(02): 256-264
[27] 熊万英, 王建. 江苏沿海滩涂可持续发展研究[J]. 国土与自然资源研究. 2004, (04): 52-54
Xiong W Y, Wang J. Study on sustainable development of flat of Jiangsu Province [J]. Territory and Natural Resource Study, 2004, (04): 52-54
[28] 殷云龙, 於朝广, 华建峰, 等. 豆科植物田菁对滨海盐土的适应性及降盐效果[J]. 江苏农业科学. 2012, 40(05): 336-338
Yin Y L, Yu C G, Hua J F, et al. The adaptability and salinity effect of leguminous sesbania plants on the coastal saline soil [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(05): 336-338
[29] 张立宾, 郭新霞, 常尚连. 田菁的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果[J]. 江苏农业科学. 2012, 40(2): 310-312
Zhang L B, Guo X X, Chang S L, et al. The salt tolerance of sesbania and its improved effect on coastal saline soil [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(2): 310-312
[30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. Analytical Methods for Soil and Agrochemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
[31] 赵秀芳, 杨劲松, 姚荣江. 苏北典型滩涂区土壤盐分动态与水平衡要素之间的关系[J]. 农业工程学报. 2010, 26(03): 52-57
Zhao X F, Yang J S, Yao R J. Relationship between soil salt dynamics and factors of water balance in the typical coastal area of Northern Jiangsu Province [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(03): 52-57
[32] 姚荣江, 杨劲松, 赵秀芳, 等. 水盐调控措施对苏北海涂油葵生长及土壤盐分分布的影响[J]. 灌溉排水学报. 2013, 32(01): 5-9
Yao R J, Yang J S, Zhao X F, et al. Effect of soil salt-water management on helianthus growth and salinity distribution characteristic of coastal saline soil in North Jiangsu Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(01): 5-9
[33] 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土水盐特性的影响[J]. 水土保持通报. 2013, 33(01): 261-264
Wang X Y, Chen X M, Li X L, et al. Effects of different amendments on water and salt characteristic of coastal saline soil [J]. Bulletin of Soil and Water conservation, 2013, 33(01): 261-264